

# 고추의汎用 乾燥模型 開發에 關한 研究

## Development of a General Drying Model of Red Pepper

趙 鏞 珍\*, 高 學 均\*\*, 朴 在 福\*

Y. J. Cho\*, H. K. Koh\*\*, J. B. Park\*

### Summary

Drying process of red pepper is very important in terms of drying cost and quality of the end product. Recently, many studies on red pepper drying have been performed.

Nevertheless, an optimum drying condition is not established yet. Drying characteristics of red pepper is much affected by drying factors such as variety and initial state of red pepper as well as by environmental drying factors such as temperature and relative humidity of drying air. Various varieties of red pepper are being cultivated and the initial state of red pepper at harvest is very ambiguous.

For this reason, it is very costly and time-consuming to establish an optimum drying condition of red pepper by experiment. A general drying model to describe a drying process has not been developed due to diversity of drying characteristics of red pepper.

This study was, therefore, performed to develop a general drying model describing a drying process of red pepper. The results from this study are summarized as follows.

1. A basic model was established to develop an appropriate moisture content model and temperature model describing a drying process of red pepper, and the basic model was validated with experimental data.
2. The bone dry weight of fruit and moisture content were accepted satisfactorily as parameter to define the arbitrary red pepper.
3. The equilibrium moisture content of red pepper was found out to be different according to the variety of red pepper, air temperature and relative humidity. Also, the EMC model was developed using the parameters of air temperature, relative humidity and bone dry weight of fruit.
4. A general drying model for red pepper was developed, parameters of which were expressed as the function of drying factors related with drying phenomena. The developed drying model was found out to describe well the drying process of red pepper.

### I. 緒 論

乾燥過程은 수분 이동 및 열전달의 복합적인 현상으로 이해되고 있다. 고추는 과피(pericarp), 태좌(placenta), 격벽(dissepiment), 씨

(seed) 및 꼭지(calyx)로 구성되어 있는 바, 크기와 형상이 불규칙적이고 구성요소에 따라서 성질이 크게 다른 不均(heterogeneous) 물질이기 때문에 고추의 乾燥過程을 간단히 모형화하기란 매우 어려운 문제이다. 더구나 고추는 손

\* 韓國食品開發研究院

\*\* 서울대학교 農科大學 農工學科

乾燥過程에 걸쳐서 초기함수율부터 최종함수율까지의 함수를 변화가 대단히 크고 이러한 현상에 수반하여 물리적 성질도 매우 크게 변할 수 있기 때문에 고추의 乾燥過程을 모형화하는 것은 용이하지 않다. 특히 고추는 品種에 따라서 乾燥特性이 크게 상이할 뿐만 아니라 동일한 품종이라도 수확시기에 따라서 乾燥特性이 다르게 나타날 수 있기 때문에 고추의 건조모형을 개발한다는 것은 어려운 문제로 이해되고 있다.

그럼에도 불구하고 고추의 乾燥過程을 모형화하고자 하는 것은 건조모형을 통하여 고추의 乾燥特性을 쉽게 파악할 수 있을 뿐만 아니라 최적 건조조건을 구명하기 위한 最適化 연구에 건조모형을 유용하게 이용할 수 있게 되고 나아가서 건조기를 설계하고자 할 때 기초자료를 얻을 수 있기 때문이다. 더구나 우수한 건조모형은 정확한 모의실험을 가능하게 하여 실험적 방법에 소요되는 시간과 비용을 크게 절감할 수 있기 때문이다.

현재까지 고추의 乾燥特性을 분석하여 건조모형을 개발하여 제시하고 있는 연구결과는 趙와 高(1986), 李 等(1988), Lee와 Kim(1988) 등이 있다. 趙와 高(1986) 및 李 等(1988)은 함수율 모형만을 취급하였는데 여기서 함수율 모형은 개별 품종을 대상으로 한 제한된 모형으로 개발되었다. 한편, Lee와 Kim(1989)은 품질 모형만을 다루었다. 고추의 건조 모형을 이용하여 乾燥過程의 最適化 연구를 수행하기 위해서는 함수율 모형, 품질 모형 외에 온도 모형까지를 고려한 종합적인 乾燥模型이 필요하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 환경적 건조 요인으로서 공기의 온도 및 상대습도를 도입하고, 물질의 성질과 관련된 건조 요인으로는 초기함수율 및 최종함수율 외에 고추의 품종이나 수확시기를 반영하는 범용의 건조 모형을 개발하는 데 이용될 수 있는 유의한 물리적 성질에 관한 건조 요인을 구명한 후 고추에 범용으로 적용할 수 있는 함수율 모형 및 온도 모형을 개발하고자 하였다.

### 가. 含水率 模型

乾燥過程時 흡습성 통기성 물질의 함수율 모형은 그 물질의 건조 특성에 의해 결정되는 바, 건조 특성을 수학적 모형으로 표시하기 위하여 많은 건조 이론이 제안되고 있으나 乾燥過程에 있는 물질의 수분 이동율에 관한 모형은 일반적으로 2가지 유형으로 구분할 수 있다. 즉, 물질 내부에서의 수분 이동은 수분 경사로부터 비롯된다는 모형과 수분 경사 및 온도 경사로부터 비롯된다는 모형이다.

만약, 온도 경사가 수분 이동율에 미치는 영향이 매우 작다면 質量保存의 法則(law of mass conservation)에 의한 물질수지(mass balance) 관계로부터 매우 긴 원통의 형상을 가지는 흡습성 통기성 물질을 대상으로 다음과 같은 (1) 식을 얻을 수 있다. 이때 흡습성 통기성 물질이 균일한 물질이라면 반경 방향의 1차원 수치 관계식만을 고려하더라도 충분하게 된다.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{D}{r} \frac{\partial M}{\partial r} + D \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 M : 함수율  
 t : 시간  
 D : 수분확산계수  
 r : 반경 방향으로의 거리

(1) 식에서 물질 내부에서의 수분이동 저항이 매우 작은 경우에 (1) 식은 근사적으로 다음과 같은 (2) 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dM_m}{dt} = -\frac{3D}{R^2}(M_m - M_e) \dots\dots\dots (2)$$

여기서 M<sub>m</sub> : 평균함수율  
 M<sub>e</sub> : 평형함수율  
 R : 건조경로  
 t : 시간

한편, 趙(1986)는 이미 해석학적 방법에 의해 (3) 식과 같은 관계식을 유도하여 제시하였다.

## II. 基本 模型 設定

$$\frac{dM_m}{dt} = \frac{\alpha_1^2 D}{R^2} (M_m - M_e) \dots\dots\dots (3)$$

여기서  $\alpha_1$ : Bessel 함수에서의 무차원수

결국, (2) 식은 다음과 같은 가정을 만족할 때 乾燥過程時의 含水率 模型으로 적용할 수 있게 된다.

- ① 均一物質이다.
- ② 熱의 水分擴散의 영향을 무시할 수 있다.
- ③ 물질 내부에서의 水分移動 抵抗이 매우 작다.
- ④ 乾燥過程 동안 물질의 경계는 平衡含水率을 유지한다.

그러나, 고추는 과피, 태좌, 씨 등으로 구성된 不均一 물질이기 때문에 (2) 식에 포함되어 있는 위와 같은 가정 중에서 均일 물질이라는 가정에 위배되므로 (2) 식을 고추의 含水率 模型으로 직접 적용하기가 어렵게 된다.

그런데, 고추는 不均一 물질이라도 구조적인 특성 뿐만 아니라 과피에 함유되어 있는 수분의 양이 전체 고추에 함유되어 있는 수분의 약 80% 이상에 달하기 때문에 고추의 반경 방향으로는 不均一 물질의 성질을 가지고 있다 하더라도 원주 방향으로는 각각의 구성 물질에 대해서 均일한 성질을 가진다고 가정하고, 반경 방향으로는 均일한 물질이 증착되어 있다고 가정한다면 (2) 식에서 단일물질에 대한 수분확산계수를 有效水分擴散係數(effective moisture diffusion coefficient)로 대체하여 다음과 같은 (4) 식을 얻을 수 있게 된다.

$$\frac{dM_m}{dt} = -\frac{3D_e}{R^2} (M_m - M_e) \dots\dots\dots (4)$$

- 여기서  $M_m$ : 평균含水율(dec. db)
- $M_e$ : 평형含水율(dec. db)
- $D_e$ : 유효수분확산계수( $cm^2/hr$ )
- $R$ : 건조경로( $cm$ )
- $t$ : 시간( $hr$ )

한편, (2) 식에 도입된 가정 중에서 乾燥過程

동안 물질의 경계는 平衡含水率을 유지한다는 가정은 일반화된 가정이고, 고추의 경우 표면이 왁스층으로 싸여 있어 수분이동 저항이 고추의 표면에 집중되어 있다고 볼 수 있기 때문에 결국 (4) 식을 고추의 함수를 모형으로 채택하기 위해서는 熱의 水分擴散의 영향을 무시할 수 있는지에 대한 검토가 필요하게 된다.

나. 溫度 模型

乾燥過程동안 열에너지가 흡습성 통기성 물질에 전달되면 투입된 에너지는 물질의 온도 상승과 물질에 함유되어 있는 수분의 증발에 사용된다. 따라서 다음과 같은 에너지 保存의 法則(law of energy conservation)이 성립된다.

$$\left[ \begin{array}{l} \text{被乾燥物에 투입된} \\ \text{열에너지} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{被乾燥物의 溫度 上昇에} \\ \text{소요된 에너지} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{l} \text{水分 蒸發에} \\ \text{소요된 에너지} \end{array} \right] \dots\dots\dots (5)$$

(5) 식에서 각 항에 관련된 내용을 고찰하면 다음과 같다.

i) 乾燥物質에 투입된 열에너지: 외부 열원으로부터 흡습성 통기성 물질에 제공되는 열에너지는 대류, 복사 및 전도 또는 이들의 혼합 형태로 전달된다. 일반적으로 농산물의 건조에는 열풍에 의한 대류 열전달이 이용되는 바, 열에너지는 외부 열원으로부터 물질의 표면으로 전달된다. 여기서는 대류 열전달만을 고려하기로 한다.

ii) 被乾燥物의 온도 상승에 소요된 에너지: 물질 표면에 전달된 열에너지는 일반적으로 물질 내부에서 전도 현상에 의해 전달되는 것으로 간주하여 Fourier의 전도 법칙을 적용하고 있다. 그러나 고추는 형상이 불규칙할 뿐만 아니라 여러가지 물질로 구성된 不均一 물질이기 때문에 해석상의 난점을 안고 있다. 만약 Biot수가 매우 작은 값을 가진다면 시간에 따른 고추의

온도 변화는 集中熱容量法(lumped-heat-capacity method)에 의해 해석될 수 있다.

iii) 被乾燥物에 함유되어 있는 수분의 증발에 소요된 에너지: 물질로 전달된 열에너지의 일부는 수분의 증발을 위하여 잠열로 소요된다. 이때 소요되는 열에너지는 蒸發 潛熱과 乾燥率의 곱의 향으로 표시된다.

따라서, i, ii 및 iii의 고찰로부터 乾燥過程 동안의 흡습성 통기성 물질의 에너지 수지식은 다음과 같은 (6) 식으로 표시될 수 있다.

$$-h A_s(T_m - T_a) = m C_m \frac{dT_m}{dt} - m_b L \frac{dM_m}{dt} \dots\dots\dots (6)$$

- 여기서  $T_m$ : 흡습물질의 평균온도(°C)
- $T_a$ : 주변 공기의 온도(°C)
- $M_m$ : 흡습물질의 평균함수율(dec. db)
- $t$ : 시간(hr)
- $h$ : 대류 열전달계수(J/cm<sup>2</sup>Chr)
- $A_s$ : 흡습물질의 표면적(cm<sup>2</sup>)
- $m$ : 흡습물질의 질량(g)
- $m_b$ : 건물질의 질량(g)
- $C_m$ : 흡습물질의 비열(J/g°C)
- $L$ : 고추에 함유되어 있는 수분의 蒸發 潛熱(J/g)

한편, (6) 식에서 乾燥率이 0인 경우에서 건량 기준 함수율의 정의를 이용하여 다음과 같은 (7) 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dT_m}{(T_m - T_a)} = -\alpha dt \dots\dots\dots (7)$$

여기서  $\alpha = (h A_s) / (m_b (1 + M_m) C_m)$

(7) 식을 적분한 다음, 다시 시간에 대해서 미분하여 온도 변화율을 (6) 식에 대입하면 (8) 식과 같은 온도 모형을 얻을 수 있다.

$$T_m = T_a + (T_{m0} - T_a) \exp(-\alpha t) + \frac{m_b L}{h A_s} \frac{dM_m}{dt} \dots\dots\dots (8)$$

이때, (8) 식의 전개 과정에서 도입되었던 가정 즉, Biot 수가 매우 작은 값을 가진다는 가정에 대한 검증이 필요하게 된다.

### III. 資料 및 方法

#### 가. 實驗裝置

##### 1) 乾燥裝置

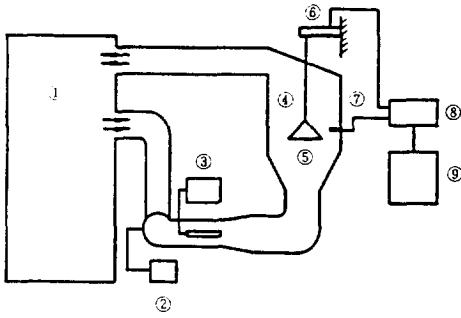
일정한 건조조건을 제공하기 위하여 항온항습기와 건조실이 사용되었다. 항온항습기는 공기의 건조온도와 노점온도를 조절하는 방식에 의해 공기 조건을 일정하게 유지할 수 있으며 일정한 조건을 가지는 공기가 임의의 속도로 균일하게 유동할 수 있는 건조실이 제작되어 항온항습기와 연결되었다. 건조실의 유입관에는 공기의 이송 도중 열손실로 인한 온도 강하를 보상해 주기 위하여 보조전열기 및 제어반이 설치되었다. 그림 1과 표 1은 각각 乾燥裝置의 개략도와 명세를 나타낸 것이다.

Table 1. Specification of drying equipments

Item	Specification
Air conditioner	Dry bulb temperature : room temp. to 95°C
	Dew point temperature : room temp. to 95°C
	Sensitivity: 0.4%
Experimental dryer	Dimension of chamber : 400×400×600mm
	Subsidiary heater: 600W
	Sensitivity of controller: 0.3%
	Motor: DC 100W Fan: Centrifugal type

##### 2) 무게 및 溫度 측정장치

乾燥過程 동안 고추의 무게를 연속적으로 측정하기 위하여 로드셀을 사용하였다. 건조실 내의 고추의 무게는 로드셀에 의해 전기적 신호로 변환되어 증폭기를 거치고 다시 아날로그-디지털 변환기를 거친 후 디지털 신호로 개인용 컴



- 1. Air conditioner
- 2. Blowing system
- 3. Subsidiary heater and controller
- 4. Drying chamber
- 5. Tray
- 6. Load cell
- 7. Temperature sensors
- 8. Filter and amp.
- 9. Data acquisition system

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus for the drying test

퓨터에 입력되도록 하였다. 컴퓨터에 입력된 신호는 프린터로 출력됨과 동시에 플로피 디스켓

에 저장되도록 하였다. 이때 무게 환산은 다음과 같은 (9) 식에 의해 이루어졌다.

$$W_t = -243.6 + 0.4017 D : (R^2 = 0.9999) \dots (9)$$

여기서  $W_t$  : 무게(g)

$D$  : 디지털 값

Table 2. Equations for calibration of temperature

Channel	Equation for calibration	$R^2$
1	$T = -0.6414 + 0.02489 D$	0.9998
2	$T = -0.6155 + 0.02554 D$	0.9999
3	$T = -1.4565 + 0.02560 D$	0.9999
4	$T = -0.4855 + 0.02565 D$	0.9997
5	$T = -1.0951 + 0.02530 D$	0.9996
6	$T = -1.7088 + 0.02535 D$	0.9995

Notes)  $T$  : temperature( $^{\circ}C$ )

$D$  : digital value

Table 3. Specification of equipments for measuring weight and temperature

Item	Specification
<b>WEIGHING SYSTEM</b>	
Load cell	Rated output : 9.2825mV/10V Resolution : 1/5000 Max. loading : 2.5kg
Filter & amp.	Made by Hando Eng.(Korea)
A/D converter	Conversion time : 25 $\mu$ s Resolution : 12bits No of channels : 8chs
Personal computer	NEC PC-8001 MK II (Japan)
Accuracy for weighing	0.1g
<b>TEMPERATURE MEASUREMENT SYSTEM</b>	
Sensor	Pt 100 $\Omega$ Prove type : d=3mm Plate type : 3.5 $\times$ 4.5mm
R/V converter	Made by Hando Eng.(Korea)
No of channels	Prove type : 4chs Plate type : 2chs
Personal computer	NEC PC-8001 MK II (Japan)
Range of measurement	30 to 95 $^{\circ}C$
Accuracy for measurement	0.1 $^{\circ}C$

한편, 고추의 온도는 Pt100Ω에 의한 저항식 온도계측시스템이 사용되었다. 이때 온도 센서는 프로브형(probe type)과 플레이트형(plate type)이 사용되었다. 온도계측 시스템은 무게측정 시스템과 유사하게 구성되었다. 다만, 온도측정 시스템에서는 무게측정 시스템에서 전압 증폭기가 사용된 것과는 달리 저항-전압 변환기가 사용되었다. 표 2는 디지털 값을 온도로 환산하는 관계식을 나타낸 것이다.

표 3은 무게 및 온도 계측에 사용된 장치들의 명세를 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 무게 측정을 위해서는 1개의 채널이 사용되었고 온도 측정을 위해서는 6개의 채널이 사용되었다. 특히 온도용 채널 중 4개의 채널에는 프로브형의 센서가 연결되어 공기의 건습구 온도와 고추의 내부 온도를 측정할 수 있도록 하였고 2개의 채널에는 플레이트형의 센서가 연결되어 고추의 표면 온도를 측정할 수 있도록 하였다.

나. 實驗材料

실험에 사용된 고추는 농촌진흥청 원예시험장에서 재배한 것으로 적토마, 다복, 진술의 3가지 품종이 사용되었다. 수확은 1989년 8월 7일부터 8월 31일까지 실험 일정에 맞추어서 실시하였다. 한편, 고추의 물성치를 분석하기 위하여 1989년도에 원예시험장에서 생산된 고추 뿐만 아니라 1990년도에 생산된 고추(적토마, 홍일)를 이용하였고 충북 음성에서 생산된 고추 중에서 품종이 확인된 건조추를 구입하여 완전히 건조된 고추의 무게를 측정하는 데 이용하였다.

다. 實驗方法

1) 고추의 초기 과피 두께와 여러가지 물리적 성질 측정

특정 한 고추가 고추의 乾燥特性에 영향을 미치는 데에 있어서 그 고추를 대표할 수 있는 물리적 성질을 찾고자 고추의 초기 과피 두께, 초기 무게, 초기 함수율, 완전 건조된 무게, 투영면적,

부피, 밀도, 초기 수분중량 등을 측정하여 품종별 및 전체 고추의 초기 과피 두께와 여러가지 물리적 성질과의 상관 관계를 조사하였다. 여기서 고추의 투영면적은 전자복사기에 의해 투영된 면적을 구적계를 이용하여 측정하였고 부피와 밀도는 platform scale method에 의해 측정하였다.

2) 함수율에 따른 과피 두께 측정

함수율과 과피 두께의 관계를 구명하기 위하여 각 품종당(적토마, 다복, 진술, 홍일) 50개씩의 고추를 임의로 채취하여 각각의 고추에 대해서 함수율에 따른 과피 두께를 버어니어 캘리퍼스를 이용하여 측정하였다.

3) 고추 무게에 따른 표면적

3가지 품종(적토마, 다복, 홍일)에 대해서 완전건조된 고추 무게에 따른 표면적을 측정하여 그 관계를 규명하고자 하였다. 품종별로 10개씩의 고추를 임의로 채취하여 완전건조된 고추의 무게를 측정하고, 과피가 유연성을 가질 때까지 흡습시켜 고추를 절개한 후 표면적이 평면상에 완전히 투사되도록 하였다. 이와 같이 투사된 구적계(planimeter)를 이용하여 측정하였다.

4) 건조실험

여러가지 공기 조건하에서 시간에 따른 고추의 함수율 및 온도 변화를 측정하기 위하여 건조실험을 실시하였다. 약 100g의 고추를 채취하여 시간에 따른 무게를 연속적으로 측정한 후 함수율로 환산하였다. 건조 전후에 별도로 전자저울을 이용하여 무게를 측정한 후 건조 실험중 부력에 의한 영향을 보정하였다.

Table 4. Drying conditions for the drying experiment

No of tests	Temperature(°C)	Relative humidity(%)
24	50~80	20~80

표 4는 건조실험시 건조조건의 범위를 나타낸 것이다. 건조실험을 수행하면서 공기의 건구온도 및 습구온도를 측정하여 건조조건을 확인하였고, 공기의 유속은 0.5m/s로 일정하게 유지하였다.

5) 고추의 열전달 특성 실험

고추의 대류 열전달 특성을 분석하고자 공기의 상대습도를 약 100%로 유지하여 초기 고추의 무게 변화가 발생되지 않는 조건하에서 공기 및 고추의 온도를 측정하였다.

6) 平衡含水率 실험

고추(적토마, 다복, 홍일)를 품종별로 표 5와 같은 조건하에서 동적측정법(dynamic method)에 의하여 평형함수율을 측정하였다. 여기서 약 10시간 동안 무게 변화가 발견되지 않을 때 평형함수율로 채택하였다.

Table 5. Air conditions for the measurement of the equilibrium moisture content

Temperature(°C)	Relative humidity(%)
50~80	20~85

7) 함수율 측정

함수율 측정은 공기오븐법으로 실시하였는데 105°C에서 24시간 동안 가열한 후 데시케이터 속에 넣어 실온과 평형을 이루게 한후 무게를 측정하여 함수율로 환산하였다.

8) 통계적 분석

건조모형의 개발 과정에서 필요한 모든 통계적 분석은 SAS/STAT(version 6.04)에 의해 이루어졌다.

IV. 結果 및 考察

가. 基本 模型의 妥當性 檢證

고추의 건조과정에 적용할 수 있는 含水率 模

型 및 溫度 模型의 타당성을 검증하기 위하여 각각의 모형에 대한 기본 모형을 수립할 때 전개 과정에서 도입되었던 가정에 대하여 實驗的 檢證이 필요하게 된다. 여기서 검증되어야 할 가정으로서 열적 수분확산의 영향을 무시할 수 있는 경우와 집중열용량법의 적용 가능성에 대하여 考察하기로 한다.

열적 수분확산은 물질 내에 존재하는 온도 경사 때문에 발생된다. 만약, 물질 내에 존재하는 온도경사가 매우 작다면 열적 수분확산의 영향은 무시될 수 있을 것이다. 일반적으로 물질 내의 온도경사에 대한 평가는 Biot수에 의해 이루어진다. 즉, Biot수가 작을수록 물질 내의 온도경사는 작아지게 된다. 실제적으로 어떤 물질에서 물질 표면에서의 무차원 온도에 대한, 표면과 중심에서의 무차원온도의 차의 비를 오차로 표시할 때 Biot수가 0.1 이하인 경우에 오차는 5% 이내로 나타나게 되어 온도경사의 영향을 무시할 수 있다.

이와 같은 Biot수의 평가를 통하여 열적 수분확산이 영향을 미치는 정도를 정확히 나타낼 수는 없으나 Biot수가 매우 작을 때 열적 수분확산의 영향이 비교적 작을 수 있다는 간접적인 결론을 도출해 낼 수 있게 된다. 또한 Biot수의 평가를 통하여 溫度 模型에서 집중열용량법을 사용할 수 있는 가능성을 진단할 수 있게 된다.

고추를 매우 긴 원통으로 가정하여 Biot수의 정의를 적용하면 다음과 같은 (10) 식으로 나타낼 수 있다.

$$Bi = \frac{Rh}{2k} = \frac{T_w - T_0}{4(T_a - T_w)} \dots\dots\dots (10)$$

여기서  $B_i$ : Biot수

$h$ : 대류열전달계수(W/m<sup>2</sup>°C)

$k$ : 열전도도(W/m°C)

$R$ : 원통의 반경(m)

$T_a$ : 공기의 온도(°C)

$T_w$ : 원통 표면의 온도(°C)

$T_0$ : 원통 중심의 온도(°C)

Table 6. Biot numbers during heating of red pepper

te	Ta	Tw	To	Bi
8	29.4	27.0	26.8	0.02
74	53.0	36.6	28.8	0.12
140	62.7	46.7	42.4	0.07
206	65.5	52.4	48.1	0.08

Notes) te : Elapsed time(sec)  
 Ta : Air temperature(°C)  
 Tw : Surface temperature of red pepper (°C)  
 To : Center temperature of red pepper (°C)

표 6은 고추를 가열할 때 시간에 따른 Biot수를 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 Biot수는 0.12이하로 나타난 바, 고추 내부에서의 온도경사는 무시할 수 있는 정도이다. 따라서 熱의 水分擴散의 영향을 무시할 수 있다고 간접적으로 추론할 수 있을 뿐만 아니라 고추의 溫度模

형을 개발할 때 集中熱容量法을 적용할 수 있는 타당성을 발견할 수 있다.

따라서, 고추의 含水率 模型과 온도 모형을 개발하기 위하여 설정되었던 기본 모형은 그 妥當性이 인정된다고 판단된다.

나. 고추의 과피두께와 乾燥重量

고추의 과피두께는 건조특성과 밀접한 관계가 있다는 것을 이미 趙와 高(1986), 李等(1988)이 지적한 바 있으며, 특히 趙와 高(1986)는 건조경로를 과피두께로 나타낼 수 있다고 하였다. 고추의 과피는 표 7과 8에서 보는 바와 같이 무게의 대부분을 차지하고 있으며 고추에 함유되어 있는 수분도 대부분 과피에 함유되어 있다.

이러한 이유로 인하여 본 연구에서는 몇가지 품종의 고추에 대해서 수확직후의 과피 두께와 고추의 여러가지 물리적 성질 사이에 나타나는 상관관계를 실험적으로 조사한 結果, 표 9에 나타난 바와 같이 수확직후의 과피 두께는 고추에 함유되어 있는 수분의 무게와 가장 큰 상관관계를 가지는 것으로 나타났다.

Table 7. Ratio of the weight of each part to the weight of the whole red pepper

Variety	MC (%wb)	Total wt(g)	Pericarp & placenta		Seed		Stem	
			Mean(%)	SD	Mean(%)	SD	Mean(%)	SD
Jugtoma	82.8	12.6	81.0	2.8	12.3	2.7	6.7	1.5
	20.3	2.3	64.1	5.9	29.1	6.0	6.8	1.0
Dabog	80.3	7.5	84.5	4.0	10.0	3.5	5.5	0.8
	17.8	2.1	67.1	2.9	27.5	2.8	5.4	1.3
Jinsol	80.6	9.3	80.2	1.8	14.6	1.6	5.2	0.6
	19.7	2.1	59.0	5.0	36.4	4.5	4.6	1.4

Table 8. Moisture content and ratio of the moisture weight in each part of the red pepper

Section	MC(% wb)	Ratio
Whole	83.0	—
Pericarp	86.9	0.82
Seed & placenta	67.0	0.18

한편, 건량기준 함수율의 정의로부터 고추에 함유되어 있는 수분의 무게는 고추의 함수율 뿐만 아니라 乾燥重量과 밀접한 관계를 갖는 것을 알 수 있다.

이러한 結果로부터, 고추의 과피두께와 밀접한 관계를 갖고 있는 乾燥重量은 함수율과 함께 평형함수율 모형이나 건조모형에서 유의한 매개 변수가 될 수 있을 것으로 판단된다.





equation 과 Chung equation을 표준 모형으로 제시하고 있다. 이와 같은 모형들은 공기의 온도와 상대습도가 주어질 때 해당 물질의 平衡含水率을 예측할 수 있도록 개발되었다.

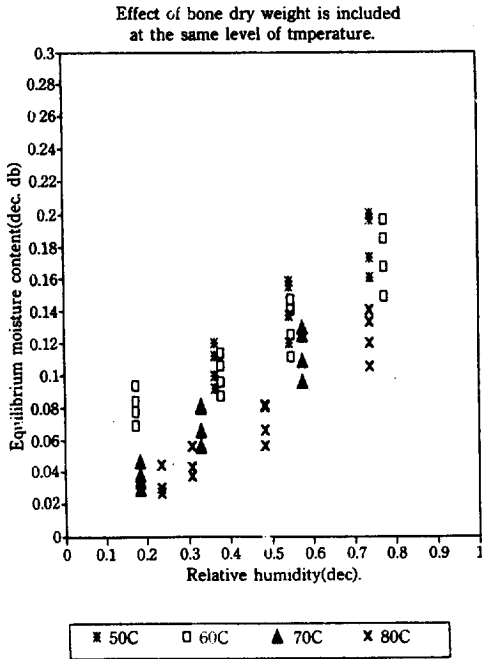


Fig. 2. Distribution of experimental equilibrium moisture contents depending on air condition and bone dry weight of fruit

그림 2는 여러가지 공기 조건과 몇가지 품종 중에서 고추의 個體 乾燥重量에 따른 平衡含水率의 분포를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 것과 같은 平衡含水率의 분포를 분석한 결과(건물 중량에 의한 영향은 그림 3 참조), 고추의 平衡含水率은 공기의 온도 및 상대습도에 따른 平衡含水率의 관계를 수학적 함수로써 나타낼 경우 다음과 같은 (11) 식이 가장 적합하였다. (11) 식은 Chung equation의 근간의 되는 함수와 동일한 형태임을 보여주고 있다.

$$M_e = A \ln(-\ln(RH)) + C \dots\dots\dots (11)$$

여기서  $M_e$  : 平衡含水率(dec. db)

RH : 공기의 상대습도(dec.)

A, C : 공기의 온도 및 고추의 個體 乾物重量에 관련된 상수

(11) 식에서 기울기(A)와 절편(C)이 공기의 온도 및 고추의 個體 乾物重量에 의해 나타나는 관계를 구명하고자 통계적 모형 분석을 수행하였다. 통계적 모형 분석은 SAS/STAT(version 6.04)의 RSQUARE procedure 및 REG procedure에 의해 이루어졌다. 통계적 모형을 사용하여 REG procedure에 의해 매개변수를 추정하고 각 모형에 의해 예측된 값을 실제값과 비교한 결과, (12) 식과 같은 모형이 가장 우수한 것으로 분석되었다.

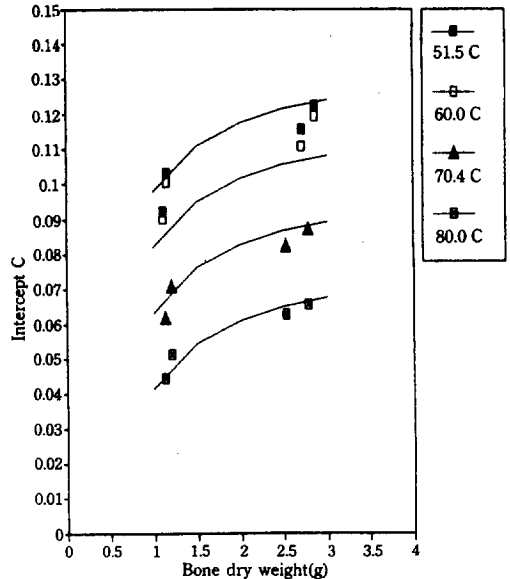


Fig. 3. Actual and estimated values of intercept C in equation (12)

한편, 그림 3은 (12) 식에서 절편(C)의 실제값과 통계적 모형에 의한 예측치를 나타낸 것이다. 또한, 평형함수율에 관한 실험치와 (3-26)식에 의한 예측치를 비교한 결과, 실험치와 예측치 사이에서 결정계수는 0.9717, root MSE 는 0.007999로 나타났다.

$$M_e = A \ln(-\ln(RH)) + C \dots\dots\dots (12)$$

( $R^2=0.9717$ , Root MSE=0.007999)

$$A = -0.059590$$

$$C = 0.17711 - 0.000015051 T^2 - 0.039181/m_b$$

$M_e$  : 평형함수율(dec. db)

T : 공기온도(°C)

RH : 상대습도(dec.)

$m_b$  : 고추의 개체 건물중량(g)

따라서, 고추의 평형함수율은 품종의 구분없이 공기의 온도 및 상대습도, 그리고 고추 1개의 평균 건물중량이 주어질 때 위와 같은 (12) 식에 의해 예측할 수 있다. 그림 4는 (12) 식에 의해 추정된 평형함수율을 나타낸 예이다.

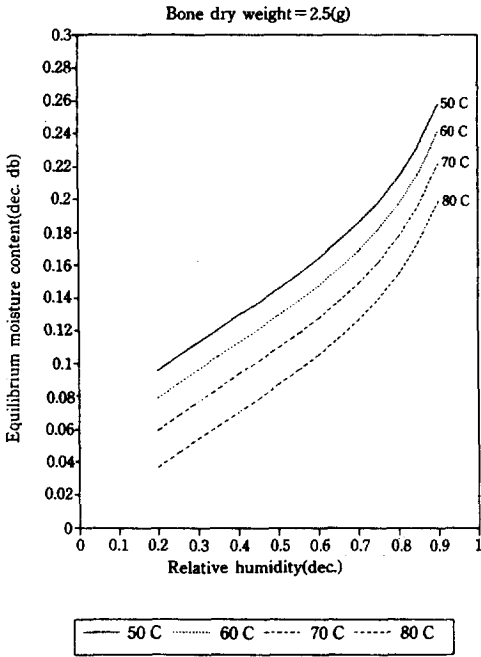


Fig. 4. Estimated equilibrium moisture contents with respect to relative humidity and temperature when bone dry weight of fruit is 2.5g

라. 含水率 模型 關係 因子

여기서는 먼저 자유수분함량에 따른 건조율을 살펴본 후, 건조요인들이 함수율 모형과 관련된 인자에 미치는 영향을 분석하고 모형화하여 고

추의 함수율 모형을 범용화하고자 하였다.

1) 自由水分含量에 따른 乾燥率

일반적으로 물질의 건조특성을 파악하기 위해서 시간에 따른 함수율의 변화, 시간에 따른 乾燥率의 변화, 함수율에 따른 乾燥率의 변화 등의 형태로 그 특성을 파악하고 있는데, 趙와 高(1986)는 시간에 따른 함수율 및 乾燥率의 변화를 분석하여 考察한 바, 열풍 대류건조시 항률건조 기간은 나타나지 않았고 3차의 감률건조 양상이 나타났다고 보고하였다.

여기서는 자유수분함량에 대한 乾燥率을 그림으로 나타내어 고추의 건조특성을 考察하기로 한다.

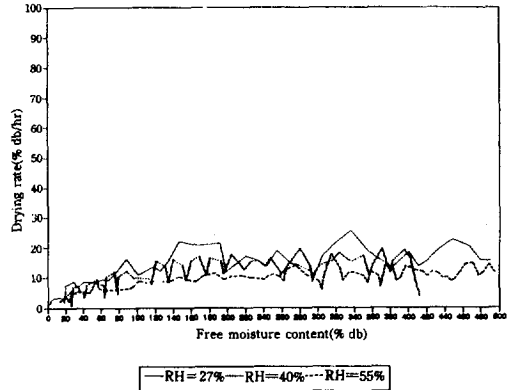


Fig. 5. Drying rate with respect to free moisture content during heated-air drying at 50°C

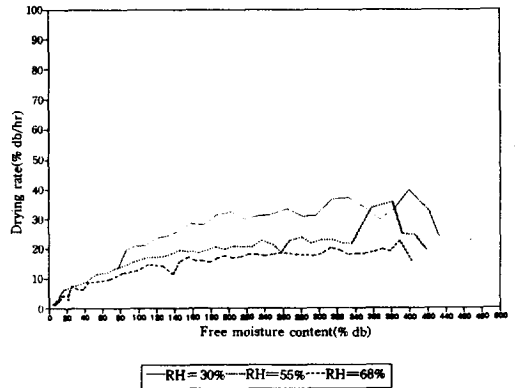


Fig. 6. Drying rate with respect to free moisture content during heated-air drying at 60°C

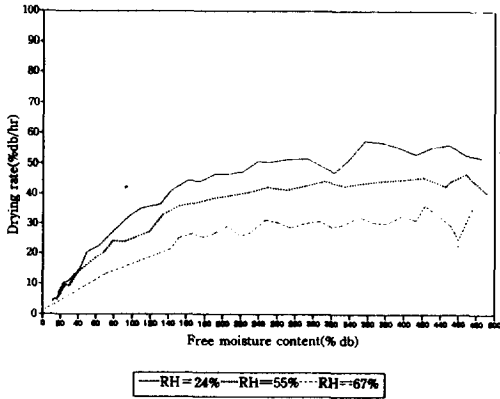


Fig. 7. Drying rate with respect to free moisture content during heated-air drying at 70°C

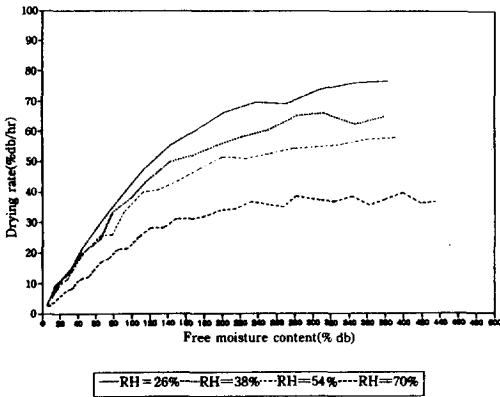


Fig. 8. Drying rate with respect to free moisture content during heated-air drying at 80°C

그림 5에서 8은 여러가지 건조 조건하에서 自由水分量에 대한 乾燥率을 나타낸 것으로서, 우선 自由水分含量과 乾燥率의 관계가 비선형임을 알 수 있다. 여기서 自由水分含量이란 함수율과 平衡含水率의 차이를 나타내는 것이므로 自由水分含量이 0이 되는 지점은 平衡含水率과 平衡을 이루게 되어 더이상 건조현상이 발생되지 않게 된다. 그림에서 보는 바와 같이 自由水分含量이 0으로 접근할 때 乾燥率도 0으로 접근하고 있음을 알 수 있다. 한편 Keey(1972)는 물질이 흡습성 및 통기성의 성질을 가지는 것에 대해, 비흡

습성 통기성 물질은 乾燥率이 일정한 크기를 가지면서 완전건조에 도달하게 되고, 흡습성 통기성 물질은 乾燥率이 0으로 접근하면서 완전건조에 도달하게 된다고 하였다. 이와 관련하여, 그림 5에서 8의 경우 平衡含水率에 상당하는 만큼의 수분이 고추에 잔존하고 있음에도 불구하고 自由水分含量이 0으로 접근할 때 乾燥率은 0으로 접근하는 결과로부터 고추도 흡습성 통기성의 건조특성을 가지는 것으로 판단된다.

## 2) 乾燥經路

긴 원통형의 물질에서 乾燥經路는 원통의 반경방향으로 나타난다. 고추의 경우, 횡단면에서 물질의 주요 구성을 살펴보면, 중심부에 종자 및 공기층이 위치하고 그 둘레를 과피가 둘러싸고 있다. 이미 앞에서 考察한 바와 같이 고추에 함유되어 있는 수분의 대부분이 과피에 함유되어 있을 뿐만 아니라, 고추의 중심부에서 종자를 제외한 공기층에서의 수분이동저항은 과피에서의 수분이동저항보다 월등히 작기 때문에 고추의 경우 趙와 高(1986)가 제안한 바와 같이 건조경로를 과피두께로 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.

여기서는 과피두께가 乾燥經路를 대표할 때, 과피두께와 관련된 고추의 물리적 성질을 考察하고, 그 물리적 성질을 매개변수로 하는, 과피두께의 모형을 제시하고자 한다.

본 연구에서 분석한 結果에 의하면, 고추의 초기 과피두께는 품종 및 기타 여러가지 요인에 의해 상이하게 나타난 바, 상이한 정도는 고추에 함유되어 있는 수분중량으로 나타낼 수 있었다. 한편, 趙와 高(1986)의 경우에서 뿐만 아니라 본 연구에서 수행된 실험 結果에 의하면 고추의 과피두께는 함수율과 밀접한 관계가 있는 것으로 파악되었다. 즉, 건조가 진행됨에 따라서 과피두께는 감소하는 것으로 파악되었다.

이러한 結果로부터 과피두께는 (13) 식과같은 함수 관계로 나타낼 수 있다:

$$d = f_1(W_o, M_m) \dots\dots\dots (13)$$

d : 과피두께  
 $W_0$  : 건조된 고추에 함유되어 있는 수분의 무게  
 $M_m$  : 고추의 함수율

(13) 식은  $W_0 = m_b, M_m$ 의 관계로부터 다음과 같은 (14) 식의 함수 관계로 변형될 수 있다.

$$d = f_2(m_b, M_m) \dots\dots\dots (14)$$

Table 11. Regression analysis for models to estimate pericarp thickness

Model	Adjusted R-square	Root MSE	Cp
$f(M_m, m_b \times M_m)$	0.9150	0.016641	27.0
$f(M_m, 1/m_b)$	0.8906	0.018828	36.1
$f(M_m, M_m^2, m_b \times M_m)$	0.9182	0.016083	16.3

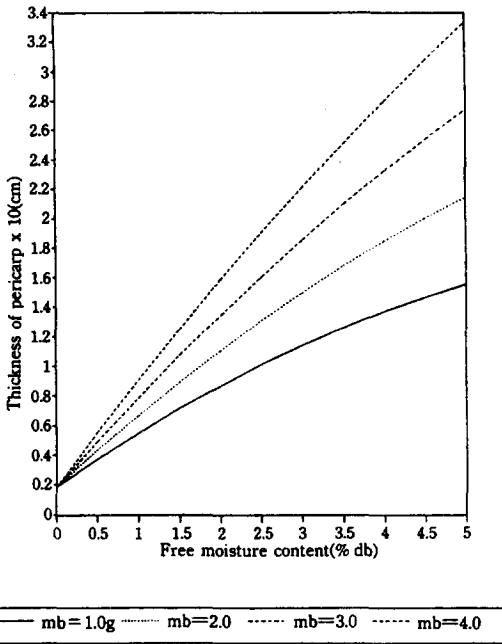


Fig. 9. The estimated thickness of pericarp with respect to moisture content for various red peppers

(14) 식의 함수관계를 실험 자료로부터 가장 적합한 통계적 모형을 찾고자 회귀분석을 실시하였다. 통계적 모형분석은 平衡含水率 模型을 개발할 때와 동일한 방법에 의해 수행하였다. 먼저 RSQUARE procedure에 의해 예비 모형을 채택한 후, REG procedure에 의해 (15)식과 같은 과피두께 모형을 최종적으로 선택하였다. 분석 결과

로 나타난 통계량은 표 11과 같다. 한편, 그림 9는 몇가지 個體 乾物重量에 대하여 함수율에 따른 고추의 과피두께를(3-29)식에 의해 추정된 값을 그림으로 나타낸 것이다.

$$d = 0.01898 + 0.02684 M_m - 0.002270 M_m^2 + 0.01186 M_m m_b \dots\dots\dots (15)$$

여기서 d : 고추의 과피두께(cm)  
 $M_m$  : 고추의 함수율(dec. db)  
 $m_b$  : 고추의 個體 乾物重量(g)

3) 有效水分擴散係數

수분확산계수는 건조모형에서 가장 중요한 매개변수 중의 하나이다. 수분확산 계수는 원래 Fick의 제1법칙에서 비례상수로 도입되었던 매개변수이지만 대부분의 농산물 건조 모형에서는 여러가지 요인의 함수로 나타내고 있다.

고추의 경우, 함수율에 관한 기본 모형으로부터 산출된 有效水分擴散係數가 함수율과 밀접한 관계가 있는 것으로 파악된 바, 有效水分擴散係數 및 함수율을 로그함수에 의해 변환시켰을 때 有效水分擴散係數와 함수율 사이에는 다음의 (16) 식과 같은 선형적 관계가 얻어졌다.

$$\ln(De) = \ln(A) + B \ln(M_m) \dots\dots\dots (16)$$

여기서 De : 고추의 有效水分擴散係數( $cm^2/hr$ )  
 $M_m$  : 고추의 함수율(dec. db)  
 A, B : 상수

Table 12. Coefficients in equations (16)

T <sub>m</sub> (°C)	RH(%)	A	B
50.8	27	0.00023891	0.57143
	40	0.00016484	0.75869
	55	0.00013214	0.65161
60.5	30	0.00033481	0.80724
	40	0.00029552	0.70399
	55	0.00025819	0.76402
	68	0.00021505	0.73830
70.0	24	0.00046373	0.89152
	40	0.00049059	0.80418
	55	0.00041368	0.84421
	67	0.00033328	0.74010
79.7	25	0.00067100	0.86668
	38	0.00059242	0.89150
	54	0.00054040	0.84976
	70	0.00035009	0.89308

(16) 식을 이용하여 각각의 건조조건하에서 산출된 有效水分擴散係數와 함수율의 관계로부터 A와 B를 구한 결과는 표 12와 같다. 표 12에서 보는 바와 같이 A의 값은 고추의 각 온도 수준에서 공기의 상대습도에 따라 일정한 경향을 나타내고 있다. 즉, 상대습도가 증가할수록 A의 값은 작아지는 것으로 나타났다. 실제로 상대습도가 100%일 때 건조현상은 발생하지 않으므로 건조모형에서 함수율이 아무리 높다하더라도 A의 값은 0이 되어야 한다.

이와 같은 경향을 모형화시켰을 때 다음과 같은 (17) 식을 얻을 수 있었다.

$$De = A M_m^b \dots\dots\dots (17)$$

$$A = 0.000041492(1 - RH) \exp(0.0405465 T_m) \dots\dots\dots (17-1)$$

$$B = 0.295258 + 0.00738769 T_m \dots\dots\dots (17-2)$$

- 여기서 D<sub>e</sub> : 有效水分擴散係數(cm<sup>2</sup>/hr)
- M<sub>m</sub> : 고추의 함수율(dec. db)
- T<sub>m</sub> : 고추의 온도(°C)
- RH : 공기의 상대습도(dec.)

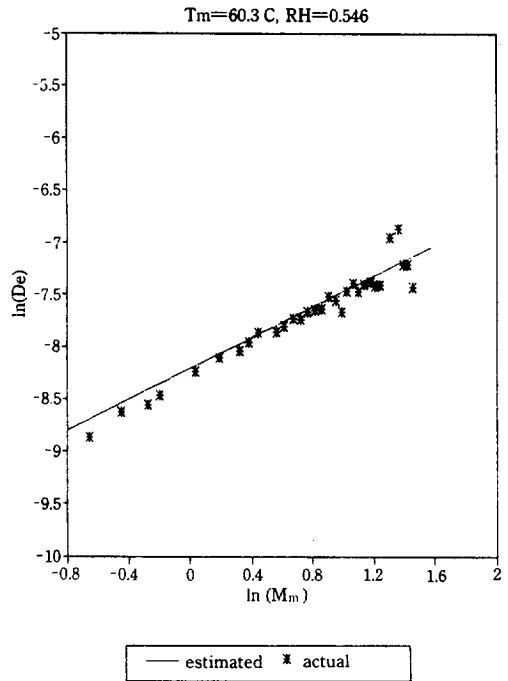


Fig. 10. Examples of actual and estimated effective diffusion coefficients

따라서, 고추의 有效水分擴散係數는 위와 같은 (17) 식에 의해 쉽게 추정할 수 있다. 그림 10은 有效水分擴散係數의 실제치와 추정치를 비교하기 위해 나타낸 예이다. 그림 10의 경우, 실제치와 추정치 사이의 결정계수는 0.8998로 나타났다. 한편, 각 건조조건별로 산출한 有效水分擴散係數의 실제치와 추정치를 비교한 결과로부터 주어진 결정계수들의 평균치는 0.9109이었다.

마. 溫度 模型 關係 因子

여기서는 건조과정시 고추의 온도 변화를 묘사하고자 온도 모형과 관련된 인자와 건조요인의 관계를 구명하여 모형화하고자 하였다.

1) 고추의 表面積

일반적으로 농산물 및 식품은 건조과정을 거치는 동안 수축현상을 수반하게 되어서 체적이나 表面積의 감소를 초래한다. 고추의 경우에는 과피의 외층이 견고한 왁스층으로 싸여있기 때문에 건조과정 동안 외관 表面積은 거의 변하지 않고 과피의 두께가 점점 얇아지는 것으로 파악

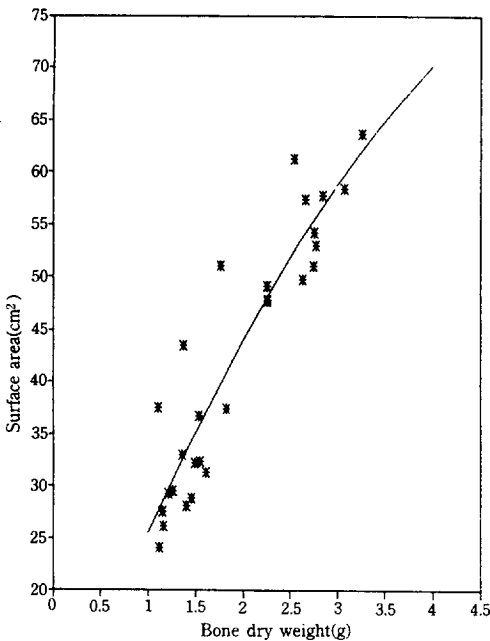


Fig. 11. Surface area with respect to bone dry weight of fruit

되었다. 따라서 고추는 건조과정 동안 일정한 表面積을 갖는 것으로 간주하였다.

흔히, 농산물의 체적이나 表面積은 함수율 또는 증량과의 관계식으로 나타내고 있다(Mohsenin, 1986). 고추의 경우는 表面積과 乾物重量 사이에서 그림 11에서 보는 바와 같이 유의한 상관관계가 발견되었다.

본 연구에서는 乾物重量에 따른 表面積을 통계적 모형으로 나타내고자 모형을 1차식과 2차식으로 표시하여 SAS/STAT의 GLM procedure에 의해 분석한 결과, 건물 증량에 따른 表面積을 (18) 식과 같은 2차식으로 나타낼 수 있었다.

$$A_s = 3.74 + 23.62m_b - 1.76m_b^2 \dots\dots\dots (18)$$

$$(R^2=0.8510, \text{Root MSE}=4.88)$$

여기서  $A_s$  : 고추의 個體 表面積 (cm<sup>2</sup>)  
 $m_b$  : 고추의 個體 乾物重量 (g)

2) 고추의 比熱

농산물 및 식품의 比熱은 함수율 뿐만 아니라 구성 성분에 따라서 달라지는데, 각각의 구성 비율이 주어진다면 比熱은 용이하게 추정될 수 있으며(Heldman and Singh, 1981; Hallstrom et al., 1988), 각 구성 성분의 비율에 따른 비열은 다음과 같은 (19) 식으로 구해진다.

$$C = 1.424 X_c + 1.549 X_p + 1.675 X_f + 0.837 X_a$$

$$+ 4.187 X_m \dots\dots\dots (19)$$

(from Heldman and Singh, 1981)

여기서 C : 비열 (J/g°C)  
 x : 무게구성비 (dec. wb)  
 Subscript c : carbohydrate  
 p : protein  
 f : fat  
 a : ash  
 m : moisture

(19) 식에서 각 물질의 구성비는 습량기준으로 표시되어 있기 때문에 함수율이 계속 변하는 건조과정에서의 溫度 模型에는 사용하기가 적합하지

Table 13. Ratio or weight of components to total weight of bone dry red pepper

Component	Carbohydrate	Protein	Fat	Ash	Moisture
Ratio	0.6882	0.1437	0.1133	0.0581	0.1496

않다. 따라서 (19) 식을 다음과 같이 전량기준으로 변환할 필요가 있다.

$$C_m = 1.424 \left( \frac{X_c}{1+X_m} \right) + 1.549 \left( \frac{X_p}{1+X_m} \right) + 1.675 \left( \frac{X_f}{1+X_m} \right) + 0.837 \left( \frac{X_a}{1+X_m} \right) + 4.187 \left( \frac{X_m}{1+X_m} \right) \dots\dots\dots (20)$$

한편, 표 13은 신 등(1989)이 여러가지 품종에 대해서 분석한 고추의 구성 성분의 무게비를 전량기준의 평균치로 나타낸 것이다.

따라서, 표 13과 같이 주어진 구성 성분의 무게비를 (20) 식에 대입하면 다음과 같은 (21) 식을 얻을 수 있다. 그림 12는 함수율에 따른 고추의 比熱을 나타낸 것이다.

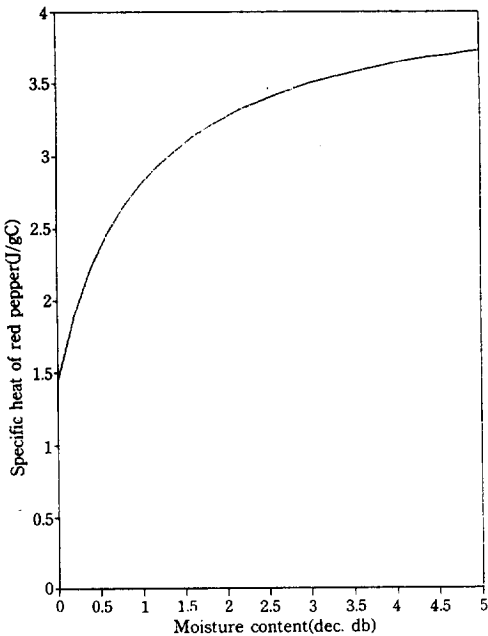


Fig. 12. Specific heat of red pepper with respect to moisture content

$$C_m = (1.441 + 4.187M_m) / (1 + M_m) \dots\dots\dots (20)$$

여기서  $C_m$  : 고추의 비열(J/g°C)

$M_m$  : 함수율 (dec. db)

3) 對流熱傳達係數

대류열전달계수는 건조과정에서 열건조율이 0일 때 (7) 식을 이용하여 구할 수 있다. 건조과정에서 건조율이 0이 되는 경우는 2가지 경우 즉, 고추의 함수율이 평형함수율에 도달하여 더 이상 건조현상이 발생하지 않는 경우와 임의의 함수율 수준에서 공기가 평형상대습도로 주어져서 건조현상이 발생하지 않는 경우이다.

그러나, 실제적으로 함수율이 平衡含水率에 도달하여 乾燥率 0이 되는 경우에 (7) 식에 적용하여 대류열전달계수를 구하고자 할 때 고추의 온도는 공기의 온도에 거의 접근해 있는 상태이기 때문에 실험시의 측정오차가 수치적 계산과정에서 매우 큰 오차를 유발할 우려가 발생하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 수확직후의 고추를 약 100%의 상대습도를 가지는 공기 중에서 함수율의 변화없이 가열하는 동안 시간에 따른 고추의 온도 변화를 측정하여 대류열전달계수를 구하였다.

(7) 식을 적분하여 다음과 같은 (22) 식으로 나타낼 수 있다.

$$\ln \left( \frac{T_m - T_a}{T_{m0} - T_a} \right) = -\alpha dt \dots\dots\dots (22)$$

$$\alpha = \frac{h A_s}{m_b C_m (1 + M_m)}$$

여기서  $T_m$  : 고추의 온도(°C)



- $A_s$  : 고추의 表面積( $cm^2$ )
- $T_{m0}$  : 고추의 초기온도( $^{\circ}C$ )
- $m_b$  : 고추의 個體 乾物重量( $g$ )
- $T_a$  : 공기의 온도( $^{\circ}C$ )
- $C_m$  : 고추의 比熱( $J/g^{\circ}C$ )
- $t$  : 시간(hr)
- $M_m$  : 고추의 含水율(dec. db)
- $h$  : 대류열전달계수( $J/cm^2C/hr$ )

(12) 식을 이용하여 3가지 품종에 대해서 적용한 結果,  $\alpha$  및  $h$ 값은 표 14와 같이 나타났다.

표 14에서 보는 바와 같이 대류열전달계수는 고추의 품종이나 온도 수준에 따라서 뚜렷한 경향을 나타내지 않았다. 따라서, 각각의 경우에 대한  $h$ 값들의 평균치로 대류열전달계수를 나타낸  $24.914 J/cm^2C/hr$ 로 나타났다.

한편, 그림 13은 (22) 식에 의한 온도비의 실제치와 예측치를 비교하기 위하여 나타낸 예이다.

Table 14.  $\alpha$  and  $h$  values for 3 varieties of red pepper under various air temperatures

Variety	Air temperature ( $^{\circ}C$ )	$\alpha$	$h(J/cm^2C/hr)$
Jugtoma	60.44	18.142	17.525
	73.38	25.728	24.854
	91.16	32.381	31.280
Dabog	63.73	23.915	19.415
	76.86	37.716	30.619
	89.72	34.473	27.986
Jinsol	66.39	25.323	20.757
	77.79	32.201	26.394
	94.93	30.986	25.398
Average			24.914

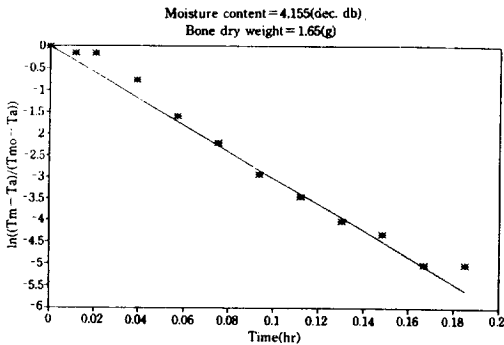


Fig. 13. Example of actual and estimated values of temperature ratio by equation (3-50)

화에 소요되는 증발 잠열이 필요하게 된다. 이때의 증발 잠열은 농산물의 온도 뿐만 아니라 함수율에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 또한 자유수의 증발 잠열과 밀접한 관계를 가지고 있다고 알려져 있다(Gallaher, 1951; Hall, 1957; Hall, 1980; 琴, 1986)

Othmer 는 Clapeyron equation을 근거로 하여 다음과 같은 (23) 식을 유도하였다(Gallaher, 1951). 이때 (23) 식은 2가지 물질의 온도가 같아야 만족을 하게 된다.

$$\log P = \frac{L}{L'} \log P' + C \dots\dots\dots (23)$$

4) 蒸發潛熱

건조 과정에서 농산물에 함유되어 있는 수분은 상변화 현상이 발생하기 때문에 수분의 상변

- 여기서  $P$  : 농산물내 수분의 증기압
- $P'$  : 자유수의 증기압
- $L$  : 농산물내 수분의 蒸發潛熱

L' : 자유수의 蒸發潛熱

C : 적분상수

(23) 식에서 자유수의 증기압 및 蒸發潛熱은 습 공기 자료(ASAE, 1983)로부터 자유수의 온도에 관한 관계식으로 주어진다. 한편 농산물 내 수분의 증기압은 평형 함수율에 관한 관계식에서 평형상대습도로부터 구할 수 있다. 이와 같이 얻어진 자료 중에서 자유수의 증기압에 대한 상용로그값을 x-축으로 하고 농산물내 수분의 증기압에 대한 상용로그값을 y-축으로 하면 함수율이 동일한 수준에서 하나의 직선을 이루게 된다. 이것을 수식으로 나타내면 다음의 (24) 식과 같다.

$$\frac{L}{L'} = \frac{\log P_2 - \log P_1}{\log P_2' - \log P_1'} \dots\dots\dots (24)$$

여기서 1, 2 : 함수율이 동일한 수준의 한 직선 상에서 서로 다른 두점 즉, 온도가 다를 때의 점

(24) 식에서  $\log P'$ 에 대한  $\log P$ 의 직선에서 기울기가  $L/L'$ 임을 알 수 있다. 따라서, 고추의 경우에 Othmer방법을 적용하고 고추의 平衡含水率에 관한 자료를 이용하면 표 15와 같은 결과를 얻을 수 있다. 여기서 고추의 경우, 개체 건물중량에 따라서  $L/L'$ 값이 구분되었다.

표 15에서 보는 바와 같이 함수율이 감소함에

따라서 蒸發潛熱比는 증가하였고 고추의 個體 乾物重量이 클수록 蒸發潛熱比는 크게 나타났다. 한편 고추의 몇가지 건물중량 수준하에서 함수율에 따른 蒸發潛熱比를 그림 14에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 함수율이 매우 낮은 수준에서는 蒸發潛熱比는 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다.

한편, Gallaher(1951)는 蒸發潛熱比를 다음과 같은 (25) 식의 형태로 나타낸 바 있다.

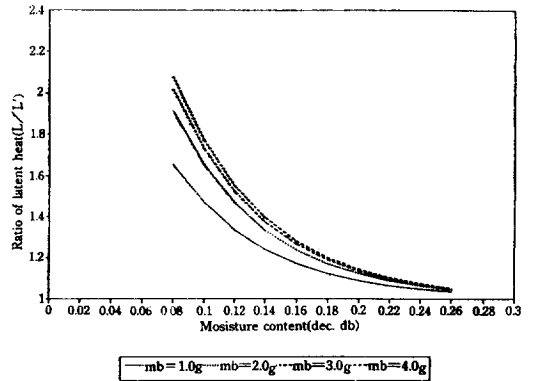


Fig. 14. Ratio of latent heat of red pepper to that of free water with respect to moisture content under various conditions of bone dry weight of red pepper

Table 15. Ratio of latent heat to that of free water by moisture content and bone dry weight of red pepper

Mm(dec.db)	L/L'			
	mb=1.0g	mb=2.0g	mb=3.0g	mb=4.0g
0.08	1.6568	1.9124	2.0181	2.0754
0.10	1.4695	1.6523	1.7278	1.7688
0.12	1.3357	1.4663	1.5203	1.5496
0.14	1.2400	1.3334	1.3720	1.3929
0.16	1.1715	1.2383	1.2659	1.2809
0.18	1.1226	1.1708	1.1901	1.2208
0.20	1.0877	1.1218	1.1359	1.1436
0.22	1.0627	1.0871	1.0972	1.1026
0.24	1.0448	1.0622	1.0695	1.0734
0.26	1.0320	1.0445	1.0497	1.0524

$$\frac{L}{L'} = 1 + A \exp(-B M_m) \dots\dots\dots (25)$$

본 연구에서도 (25) 식을 이용하여 통계적 분석을 한 결과, 표 16과 같은 결과를 얻을 수 있었다. (25) 식은 모형이 비선형의 성질을 가지기 때문에 SAS/STAT의 NLIN procedure 중의 Gauss-Newton method(Linearization technique)를 이용하여 모형을 분석하여 매개변수(parameter)를 구하였다.

표 16에서 보는 바와 같이 매개변수 B는 일정한 값으로 나타났지만 매개변수 A는 고추의 個體 乾物重量이 증가함에 따라서 증가하는 경향을 보였다.

여기서 매개변수 A가 표 16과 같은 양상을 가지는 것을 통계적 모형으로 나타내기 위하여 고추의 건물 중량에 대한 여러가지 A의 통계적 모형을 채택하여 SAS/STAT GLM procedure에 의해 분석한 결과, 다음과 같은 (26) 식이 가장 우수하였다.

Table 16. Nonlinear regression analysis for equation (25)

mb(g)	A		B	
	Estimate	Asymptotic std. error	Estimate	Asymptotic std. error
1.0	2.51467	0.000345	16.781	0.00131
2.0	3.49182	0.001386	16.777	0.00379
3.0	3.89761	0.000305	16.780	0.00075
4.0	4.11721	0.000284	16.781	0.00065

$$A = 4.6033 - 2.1080/m_b \dots\dots\dots (26)$$

(R<sup>2</sup>=0.9964)

여기서 L' : 자유수의 蒸發潛熱(J/g)  
T : 자유수의 온도(°C)

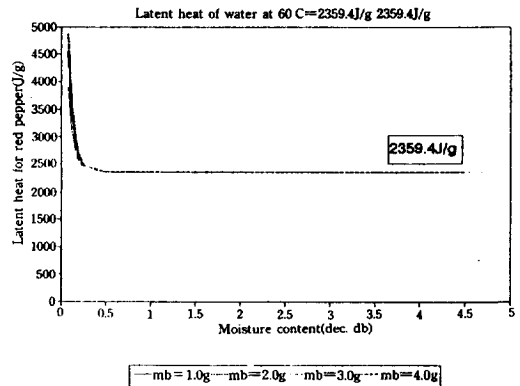
따라서, 함수를 및 고추의 건물중량에 따른 증발 잠열비는 다음과 같은 (27)식에 의해 추정될 수 있다.

여기서, 여러가지 조건하에서 고추내 수분의 蒸發潛熱을 (27)식과(28)식에 의해 추정하여 그림 15에 나타내었을 때 그림에서 보는 바와 같이 함수율이 약 50%(db)이상의 고함수율에서 고추

$$\frac{L}{L'} = 1 + (4.6033 - 2.1080/m_b) \exp(-16.78 M_m) \dots\dots\dots (27)$$

여기서 m<sub>b</sub> : 고추의 個體 乾物重量(g)  
M<sub>m</sub> : 고추의 함수율(dec. db)

이때, 자유수의 蒸發潛熱(L')은 ASAE 표준규격이 제공하는 다음과 같은 (28) 식에 의해 추정할 수 있다.



$$L' = \begin{cases} 2502.535 - 2.385764 T & \text{for } 0^\circ\text{C} \leq T \leq 65.56^\circ\text{C} \\ (7329155978000 - 15995964.08(T/273.16)^2)^{1/2} & \text{for } 65.56^\circ\text{C} \leq T \leq 260^\circ\text{C} \end{cases} \dots\dots\dots (28)$$

Fig. 15. Latent heat of red pepper depending on moisture content

내 수분의 蒸發潛熱은 자유수의 蒸發潛熱에 수렴하고 있으나 그 이하의 저함수율에서는 자유수의 蒸發潛熱에 비해 크게 증가하는 것으로 나타났다.

바. 乾燥模型의 適合性

1) 含水率 模型

고추의 건조과정에서 품종 및 기타 요인들에 의해 고추의 건조특성이 상이하게 나타나는 바, 본 연구에서는 임의의 고추가 주어졌을 때 그 고추의 건조특성을 묘사할 수 있는 범용의 含水率 模型을 개발하고자 시도하였다.

먼저, 함수율에 관한 기본 모형을 설정하고 기본 모형에 포함되어 있는 매개변수들이 여러가지 건조요인들에 의해 어떻게 영향을 받고 있는지를 분석한 후, 이들 요인들과의 함수 관계를 제시하고자 수학적 또는 통계적 모형을 개발하였다.

지금까지 함수율 모형과 관련하여 개발된 모형들을 종합하면 다음의 (29) 식과 같다.

$$\frac{dM_m}{dt} = -\frac{3D_e}{d^2} (M_m - M_e) \dots\dots\dots (29)$$

$$D_e = A M_m^B \dots\dots\dots (29-1)$$

$$A = 0.000041492(1 - RH) \exp(0.0405465 T_m) \dots\dots\dots (29-2)$$

$$B = 0.295258 + 0.00738769 T_m \dots\dots\dots (29-3)$$

$$d = 0.01898 + 0.02684 M_m - 0.002270 M_m^2 + 0.01186 M_m m_b \dots\dots\dots (29-4)$$

- 여기서  $M_m$  : 고추의 평균 함수율(dec. db)
- $M_e$  : 平衡含水率(dec. db)
- $t$  : 건조시간(hr)
- $D_e$  : 고추의 有效水分擴散係數( $cm^2/hr$ )
- $A, B$  : 계수
- $d$  : 고추의 껍피두께(cm)
- $T_m$  : 고추의 온도( $^{\circ}C$ )
- $RH$  : 공기의 상대습도(dec.)
- $m_b$  : 고추의 個體 乾物重量(g)

결국, (29) 식과 같이 주어진 含水率 模型은 공기의 온도 및 상대습도, 고추의 초기함수율 및 個體 乾物重量이 주어진다면, 그 고추의 건조과정을 묘사할 수 있게 된다. 이때, 고추의 온도는 溫度 模型으로부터 계산되어야 한다.

2) 溫度 模型

含水率 模型의 경우와 마찬가지로 온도에 관한 기본 모형을 설정한 후 기본 모형에 포함되어 있는 매개변수들과 여기에 영향을 주는 건조요인들과의 함수 관계를 구명하고 그 관계를 수학적 또는 통계적 모형으로 나타내었다.

온도에 관한 기본 모형 및 여기에 포함되어 있는 매개변수들의 특성치 또는 관계식을 종합하면 다음의 (30) 식과 같다.

$$T_m = T_a + (T_{m0} - T_a) \exp(-\alpha t) + \frac{m_b L}{h A_s} \frac{dM_m}{dt} \dots\dots\dots (30)$$

$$\alpha = \frac{h A_s}{m_b(1 + M_m)C_m} \dots\dots\dots (30-1)$$

$$h = 24.914 \dots\dots\dots (30-2)$$

$$A_s = 3.74 + 23.62m_b - 1.76m_b^2 \dots\dots\dots (30-3)$$

$$C_m = (1.441 + 4.187M_m) / (1 + M_m) \dots\dots\dots (30-4)$$

$$\frac{L}{L'} = 1 + (4.6033 - 2.1080/m_b) \exp(-16.78M_m) \dots\dots\dots (30-5)$$

- 여기서  $T_m$  : 고추의 온도( $^{\circ}C$ )
- $T_{m0}$  : 고추의 초기온도( $^{\circ}C$ )
- $T_a$  : 공기의 온도( $^{\circ}C$ )
- $t$  : 시간(hr)
- $h$  : 대류열전달계수( $J/cm^2Chr$ )
- $A_s$  : 고추의 個體 表面積( $cm^2$ )
- $C_m$  : 고추의 比熱( $J/g^{\circ}C$ )
- $L$  : 고추내 수분의 蒸發潛熱( $J/g$ )
- $L'$  : 자유수의 蒸發潛熱( $J/g$ )
- $m_b$  : 고추의 個體 乾物重量(g)
- $M_m$  : 고추의 함수율(dec. db)

따라서, 습수율 모델의 경우와 마찬가지로 건조조건이 주어진 상황에서 함수율 모형을로부터 乾燥率이 주어지면 (30) 식과 같은 온도 모델에 의해 건조 과정시의 고추의 온도 변화를 묘사할 수 있게 된다.

### 3) 모델의適合性

(29) 식의 함수율 모형과 (30) 식의 온도 모델에서 각종 매개변수(parameter)들에 관한 모형들이 실측자료 및 유도자료로부터 개발되는 과정에서 이미 통계적 분석을 하였지만, 여기서는 습수율 모델 및 온도 모형에서 최종적인 물리량인 함수율과 온도에 대해서 실측치와 예측치를 비교하고자 하였다.

한편, 함수율 모형 및 온도 모델에서 시간에 따른 함수율 및 온도는 4계 Runge-Kutta법(4th order Runge-Kutta method)에 의해 계산되었다. 이때 시간 증분은 0.1(hr)로 하였다.

그림 16부터 18까지는 여러가지 건조조건하에서 함수율 및 온도에 관하여 실측치와 예측치를 비교하기 위하여 나타낸 것이다. 그림 16 및 17은 건조 모형의 개발시에 사용되었던 실측치를 예측치와 비교하기 위하여 나타낸 것이고, 그림 18은 별도의 실험을 통하여 얻어진 실측치와 예측치를 나타낸 것이다. 여기서 乾燥模型을 통하여 예측치를 구하기 위해서는 공기의 온도 및 상대습도, 고추의 초기함수율 및 초기온도, 그리고 고추 1개의 평균 건물중량이 주어져야 한다. 그림에서 보는 바와 같이 예측치는 실측치와 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 다만, 그림 18에서 실측치를 계산하는 동안에는 일정한 공기 조건이 주어졌지만 실제 건조실험시에 건조 전반부와 후반부 사이에서 약 2°C의 온도 차이가 발생한 바, 실측의 온도와 예측한 온도 사이에서 약간의 편차가 나타났다. 한편, 함수율 모형 및 온도 모형의 적합성을 파악하기 위하여 실측치와 예측치 사이의 결정계수 및 root MSE를 분석한 바, 그림 16의 경우에서 함수율에 관한 결정계수 및 root MSE를 분석한 바, 그림 16의 경우에서 함수율에 관한 결정계수는 0.9971, root MSE는

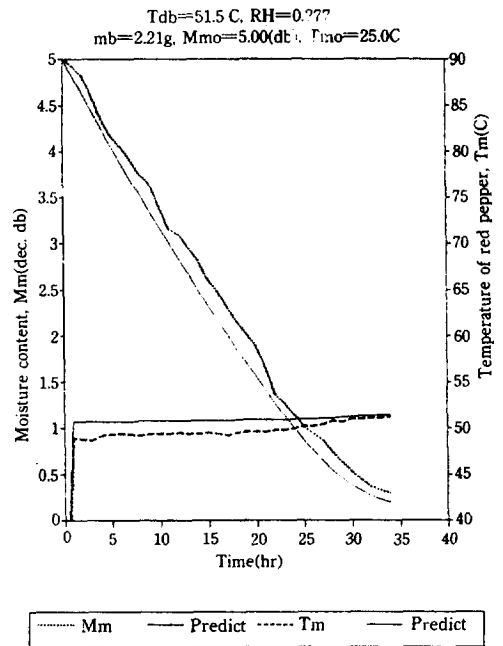


Fig. 16. Comparison of the measured and estimated values under the air condition of 52°C and 28% RH

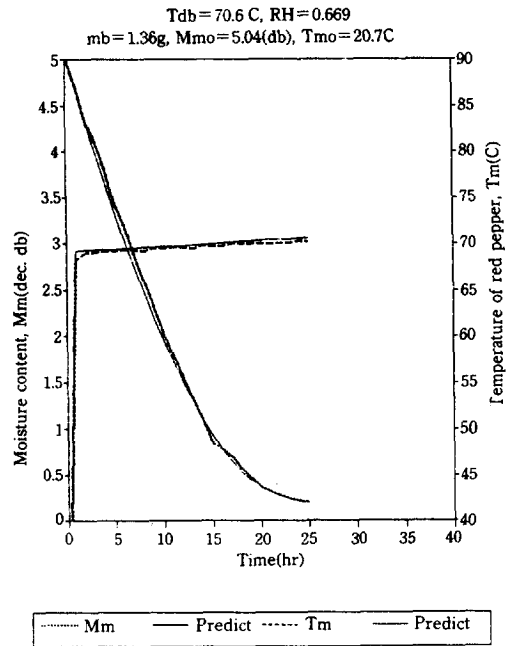


Fig. 17. Comparison of the measured and estimated values under the air condition of 71°C and 67% RH

0.08298로 나타났고, 온도에 관한 결정계수는 0.9856, root MSE 는 0.53256으로 나타났다. 그림 17과 18의 경우 뿐만 아니라 나머지 조건의 경우에서도 이와 유사한 수준으로 나타났다. 따라서, (29) 식의 含水率 模型과 (30) 식의 溫度 模型은 임의의 고추에 대해서도 건조과정을 잘 묘사할 수 있는 것으로 판단되었다.

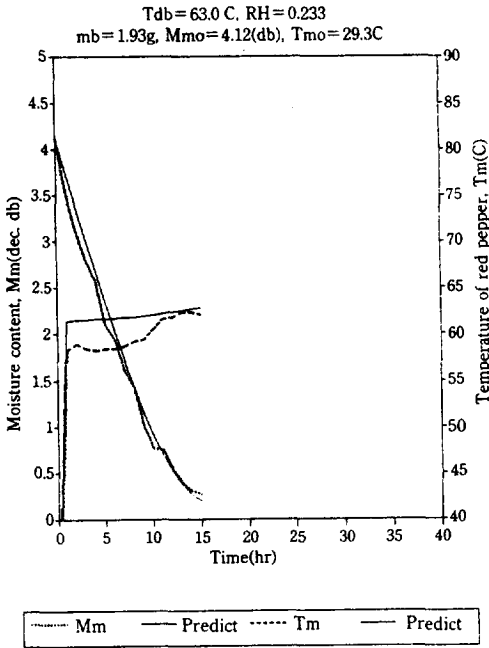


Fig. 18. Comparison of the measured and estimated values under the air condition of 63°C and 23% RH

## V. 結論 및 要約

우리나라의 농산물 중에서 가장 중요한 작물 중의 하나인 고추는 건조 작업의 개선이 시급히 요구되고 있으나, 아직 건조 조건에 따른 건조소요시간 및 소요에너지의 분석이 미흡한 실정이다.

이러한 원인은 그동안 고추 건조에 관하여 많은 연구가 수행되었음에도 불구하고 다양한 품종에 따른 건조 특성의 상이성을 제대로 구명하고 있지 못하기 때문이다. 특히, 건조특성을 실

험적 방법으로 분석하고자 할 때 시간과 비용의 제약성이 지대하여 품종의 다양성과 작물의 특성에 따른 고추의 건조특성을 종합적으로 구명하고 있지 못한 상태에 있다.

따라서, 본 연구에서는 임의의 고추에 대해서도 건조특성을 분석할 수 있도록 하기 위하여 범용의 乾燥模型을 개발하고자 한 바, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- ① 고추의 건조과정 묘사에 가장 적합한 含水率 模型 및 溫度 模型을 개발하기 위하여 기본 모형을 설정한 후, 모형의 타당성을 검토한 결과, 基本 模型의 타당성을 확인할 수 있었다.
- ② 품종 및 기타 요인에 의한 건조특성의 상이성이 고추의 과피두께와 밀접한 관계가 있는 바, 여러가지 고추의 과피두께와 물리적 성질들과의 관계로부터 고추의 함수율 및 乾物重量은 임의의 고추를 규정할 수 있는 매개변수로 채택될 수 있었다.
- ③ 고추의 품종 및 기타 요인에 의한 平衡含水率의 상이성을 모형화하고자 EMC 모형의 매개변수로서 공기의 온도 및 상대습도 외에 고추의 個體 乾物重量을 도입한 결과, 임의의 고추에 대한 平衡含水率의 예측 능력이 매우 우수한 것으로 나타났다.
- ④ 여러가지 건조조건하에서 自由水分含量에 따른 고추의 乾燥率을 분석한 결과, 고추는 흡습성 통기성 물질의 건조특성을 가지는 것으로 나타났다.
- ⑤ 고추의 함수율 모형에서 乾燥經路를 고추의 과피두께로 나타내었을 때, 과피두께를 고추의 함수율 및 個體 乾物重量에 의한 함수 관계로 나타내어 모형화하였다.
- ⑥ 고추의 함수율 모형에서 有效水分擴散係數는 고추의 함수율 및 온도 뿐만 아니라 공기의 상대습도와 밀접한 관계가 있는 것으로 분석된 바, 이들 요인에 의한 영향을 모형화하였다.
- ⑦ 여러가지 종류의 고추에 대하여 고추의 表面積과 乾物重量의 관계를 분석한 결과, 表面積을 乾物重量에 의하여 2차식의 다

· 항식으로 나타낼 수 있었다.

- ⑧ 물질의 구성 성분에 따라서 습량기준으로 주어진 比熱 관계식을 여러가지 고추에 대한 구성 성분비의 평균을 이용하여 건량기준 比熱 관계식으로 변형하여 나타내었다.
- ⑨ 고추의 온도 모형에서, 고추의 예열기간 동안 공기의 상대습도를 약 100%로 유지하는 방법에 의해 蒸發潛熱에 관한 항을 소거하여 대류열전달계수를 구한바, 평균  $24.914\text{J}/\text{cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}\text{hr}$ 로 나타났다.
- ⑩ Othmer 방법을 이용하여 고추의 平衡含水率에 관한 자료로부터 자유수의 蒸發潛熱에 대한 고추내 수분의 蒸發潛熱의 비를 분석하여 함수율 및 개체 건물중량에 관한 항으로 모형화하였다. 한편, 고추의 함수율이 약 50%(db)이상의 고함수율에서 고추내 수분의 蒸發潛熱은 자유수의 蒸發潛熱에 수렴하고 있으나 그 이하의 저함수율에서는 자유수의 蒸發潛熱에 비해 크게 증가하는 것으로 나타났다.
- ⑪ 개발된 함수율 모형과 온도 모형에 의한 예측치는 실측치와 매우 잘 일치하는 것으로 나타난 바, 개발된 건조모형은 임의의 고추의 건조 과정을 묘사하는 데 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단되었다.

### 參 考 文 獻

1. 琴東赫, 1986. 벼 乾燥過程 分析에 必要한 資料 및 關聯式. 韓國農業機械學會誌 11(2) : 92-102.
2. 신현경, 박재복, 김동철, 민봉기, 이명희, 고헌균, 조용진. 1989. 고추粉末의 加工技術開發에 關한 研究(1次年度). 研究報告書. 韓國食品開發研究院.
3. 李元碩, 高學均, 盧祥夏, 趙鏞珍. 1988. 고추의 乾燥모델에 關한 研究. 서울大學校 農學研究 13(2) : 59-71.
4. 趙鏞珍. 1986. 고추의 乾燥特性和 乾燥모델에 關한 研究. 碩士學位論文. 서울大學校 大學院.

5. 趙鏞珍. 1991. 고추의 乾燥過程 模型化 및 最適化에 關한 研究. 博士學位論文. 서울大學校 大學院.
6. 趙鏞珍, 高學均. 1986. 고추의 乾燥特性和 乾燥모델에 關한 研究. 韓國農業機械學會誌 11(1) : 52-63.
7. ASAE. 1983. Agricultural engineers year-book of standards. 30th ed..
8. Gallaher, G. L.. 1951. A method of determining the latent heat of agricultural crops. AE 32(Jan.) : 34, 38.
9. Hall, C.W.. 1957. Drying farm crops. Edwards Brothers, Ann Arbor.
10. Hall, C.W.. 1980. Drying and storage of agricultural crops. AVI publishing, Westport.
11. Hallstorm, B., C. Skjoldebrand and C. Tra-gardh. 1988. Heat transfer and food products. Elsevier Applied Science, London.
12. Heldman, D. R. and R. P. Singh. 1981. Food process engineering. 2nd ed.. AVI Publishing, Westport.
13. Keey, R. B.. 1972. Drying : principles and practice. Pergamon Press, Oxford.
14. Lee, D. S. and H. K. Kim. 1989. Carotenoid destruction and nonenzymatic browning red pepper drying as functions of average moisture content and temperature. Korean J. Food Sci. Technol. 21(3) : 425-429.
15. Mohsenin, N. N.. 1986. Physical properties of plant and animal materials. 2nd. ed.. Gordon and Breach Science Publishers, New York.